DOI:10.11931/guihaia.gxzw202310019

杉木林改造成阔叶林对根际和非根际土壤磷组分和转化的影响

向明珠[1]，李佳君[1]，黄海梅[1]，李昌航[1]，肖纳[3]，尤业明[1,2]，招礼军[1]，黄雪蔓[1,2*]

（1. 广西大学 林学院，广西森林生态与保育重点实验室，广西高校亚热带人工林培育与利用重点实验室，南宁 530004；2. 广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站，崇左凭祥友谊关森林生态系统广西野外科学研究观测站，广西 凭祥 532600；3. 广西壮族自治区河池生态环境监测中心，广西 河池 547000）

摘要：磷（P）是维持亚热带森林生态系统生产力的关键因子。杉木主要分布于我国亚热带地区，杉木林的土壤酸化，P 素利用效率低，研究杉木林转化后对土壤 P 素的影响对生态系统的稳定和森林可持续经营具有重要意义。该研究以南亚热带杉木林采伐迹地上重新种植的杉木林、红锥林、米老排林和红锥/米老排混交林为研究对象，采集根际土和非根际土，重点探究南亚热带杉木人工林改造成阔叶林后土壤 P 组分及转化的影响。结果表明：（1）改造后的红锥林、米老排林和红锥/米老排混交林的根际和非根际土壤的微生物生物量 P 含量及酸性磷酸酶活性均显著高于杉木林；红锥林和红锥/米老排混交林的土壤全 P 比杉木林和米老排林更容易转化为速效 P；（2）红锥林和红锥/米老排混交林的根际和非根际土壤中氯化钙提取 P 含量均显著高于杉木林和米老排林，米老排林和红锥/米老排混交林根际和非根际土壤中酶提取 P、盐酸提取 P 和柠檬酸提取 P 含量显著高于杉木林和红锥林；（3）RDA 结果表明调控根际和非根际土壤 P 组分的关键因子分别是土壤含水量和微生物生物量碳。综上所述，将杉木林改造成阔叶林有利于森林土壤 P 的储存和供应。该研究为提高南亚热带人工林土壤 P 有效性的树种选择和经营管理策略等方面提供重要科学依据。

关键词：杉木林，阔叶树种，根际土壤，磷组分，南亚热带

中图分类号：Q945

Effects of conversion of Chinese fir forest to broad-leaved forests on phosphorus components and transformation in rhizosphere and non-rhizosphere soils

XIANG Mingzhu[1], LI Jiajun[1], HUANG Haimei[1], LI Changhang[1], XIAO Na[3], YOU Yeming[1,2], ZHAO Lijun[1] , HUANG Xueman[1,2*]

(1. *Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory for Cultivation and Utilization of Subtropical Forest Plantation, Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, College of Forestry, Guangxi University,* Nanning 530004, China; 2. *Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem National Research Station, Youyiguan Forest Ecosystem Observation and Research Station of Guangxi,* Pingxiang 532600, Guangxi, China; 3. *Guangxi Hechi Eco-Environmental Monitoring Centre,* Hechi 547000, Guangxi, China)

基金项目：国家自然科学基金（32171755，31960240）；广西自然科学基金（2019GXNSFAA185023）；崇左凭祥友谊关森林生态系统广西野外科学观测研究站科研能力建设项目（桂科 2203513003）。

第一作者：向明珠（1998-），硕士研究生，主要从事人工林土壤养分循环研究，(E-mail)xmz18777635294@163.com。

***通信作者**：黄雪蔓，博士，副教授，研究方向为人工林土壤养分循环及其调控，(E-mail)huangxm168168@163.com。

Abstract：Phosphorus (P) is one of the essential elements for plant growth and is a key factor in maintaining the productivity of subtropical forest ecosystems. Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) is mainly distributed in subtropical areas of China, and its soil acidification and phosphorus utilization efficiency are low. It is of great significance to study the effect of Chinese fir plantation transformation on soil P for the stability of ecosystem and sustainable forest management. In this study, the rhizosphere soil and non-rhizosphere soil were collected from the replanted Chinese fir plantation, *Castanopsis hystrix* plantation, *Mytilaria laosensis* plantation and the mixed plantation of *Castanopsis hystrix* and *Mytilaria laosensis* on the cutting-blank of Chinese fir plantation in South Asia, and the effects of soil P component and transformation on the transformation of Chinese fir plantation into broadleaved forest were studied. The results showed that: (1) The content of microbial biomass phosphorus and the activity of acid phosphatase in rhizosphere and non-rhizosphere soil of the modified *Castanopsis hystrix* plantation, *Mytilaria laosensis* plantation and the mixed plantation of *Castanopsis hystrix* and *Mytilaria laosensis* were significantly higher than those of Chinese fir plantation. Soil total phosphorus of *Castanopsis hystrix* plantation and the mixed plantation of *C. hystrix* and *Mytilaria laosensis* was more easily converted to quick available phosphorus than those of Chinese fir plantation and *Mytilaria laosensis* plantation. (2) The contents of calcium chloride extraction phosphorus in rhizosphere and non-rhizosphere soil of *Castanopsis hystrix* plantation and the mixed plantation of *Castanopsis hystrix* and *Mytilaria laosensis* were significantly higher than those of Chinese fir plantation and *M. laosensis* plantation, and the contents of enzyme extraction phosphorus, hydrochloric acid extraction phosphorus and citric acid extraction phosphorus in rhizosphere and non-rhizosphere soil of *Mytilaria laosensis* plantation and *Castanopsis hystrix*/*Mytilaria laosensis* mixed plantation were significantly higher than those of Chinese fir plantation and *Castanopsis hystrix* plantation. (3) RDA results showed that soil water content and microbial biomass carbon were the key factors regulating P components in rhizosphere and non-rhizosphere soils, respectively. In summary, the transformation of Chinese fir plantation into broadleaved forest is conducive to the storage and supply of forest soil P, and this study provides an important scientific basis for tree species selection and management strategies to improve soil P availability in south subtropical plantations.
Key words：*Cunninghamia lanceolata* plantation，broad-leaved species，rhizosphere soil，phosphorus fraction，south subtropics

磷（phosphorus，P）是植物生长发育不可缺少的营养元素，以不同形态参与植物的生理活动，在植物与土壤之间不断循环（舒志万等，2022；Hu et al., 2023）。土壤中的P素受粘粒等成分的吸附和固定作用而难以被植物利用，有效磷（available phosphorus，AP）通常只占土壤全磷（total phosphorus，TP）的不到1%，成为限制植物生长的主要因素之一（Fink et al., 2016；毕庆芳，2020；谭许脉，2022）。不同树种之间对P的吸收和利用存在着差异，通过合理的人工林改造，可以缓解土壤P限制，提高植物对P的利用效率（Troitiño et al., 2008）。因此，探索人工林改造对土壤P的影响，对如何改善土壤养分和保护森林资源尤为重要。

森林土壤各P组分主要受到生物和非生物因素的影响，其含量变化影响着P的有效性（沈开勤等，2023）。土壤微生物和植物根系分泌的酸性磷酸酶（acid phosphatase，ACP），能够促进有机P矿化，是控制森林生态系统中P有效性的重要因素（Liang et al., 2020；Keller et al., 2023）；林分改造可以通过改变土壤的理化性质和微生物活性，影响土

壤中P的固定和释放（You et al., 2020）。近年来，人工林改造已成为解决我国人工林树种单一、生物多样性降低和土壤养分枯竭等问题的重要营林措施，关于人工林改造的研究主要集中在林龄和林下植被等方面（明安刚等，2015；谭许脉，2022）。在亚热带地区，人工林的改造对土壤P形态及其有效性的影响仍缺乏认识，林分改造驱动土壤P变化的主要机制尚不清楚。因此，研究林分改造后土壤理化性质和微生物活性的变化，分析P组分的变化和转化过程，可以深入了解林分改造驱动土壤P变化的主要机制，对提高土壤中P的生物有效性具有重要意义。

根际是指根系周围受根系活动显著影响的土壤区域，是土壤与植物物质和能量循环的重要场所（Kuzyakov et al., 2019; Xia et al., 2022）。根际土壤为植物和微生物提供必需的矿物质和水分，而微生物与植物根系的活动及代谢又影响着根际土壤（Peng et al., 2017）。人工林改造后，根际和非根际土壤受到植物种类、凋落物和根系分泌物的影响，不同植物的土壤pH值、养分含量和酶活性不同（李丽娟等，2020）。其中根际土壤养分含量通常大于非根际土壤，根际由于源源不断的根系分泌物输入、死亡根细胞脱落和裂解，导致根际土壤养分含量大于非根际土壤，根际土壤微生物活性和非根际土壤也存在差异（马志良等，2019）。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)因其木材用途广、产量高而在我国亚热带地区被广泛种植。然而，大部分杉木人工林以纯林方式种植，导致土壤养分枯竭、生物多样性丧失和森林生产力下降等，严重影响生态系统的稳定性（Ding et al., 2022）。营造阔叶林是改善土壤性质、延缓地力衰退的有效途径之一（林同龙，2000；林建椿，2007；谭许脉等，2022）。与针叶树相比，阔叶树种具有根系系统更为复杂，生态系统服务功能更稳定的优势（Gharu et al., 2016）。具体而言，阔叶林和针叶林之间主要由于凋落物、根系及其分泌物化学成分的不同导致土壤微生物群落组成有很大的差异（蔡锰柯，2021）。例如，红锥（*Castanopsis hystrix*）和米老排（*Mytilaria laosensis*）的细根生物量、凋落物数量和质量比杉木高，土壤微生物活性更高，利于P转化，提高生物有效P的输入（You et al., 2020），是南亚热带优良速生的用材树种，已逐渐成为最常用的阔叶造林树种（明安刚等，2015）。然而，杉木人工林改造成阔叶林后将对土壤P组分及其转化产生哪些影响？其主要的驱动因素是什么？我们仍知之甚少，这将极大限制了我们科学制定人工林可持续经营管理策略。因此，本研究通过探究南亚热带杉木人工林改造成阔叶林（红锥林、米老排林、红锥/米老排混交林）后其根际和非根际土壤P组分、MBP和ACP活性等的变化规律，并确定影响土壤P组分的最主要因子，为有效提高南亚热带人工林土壤P有效性的树种选择和经营管理策略等方面提供重要科学依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区凭祥市中国林业科学研究院热带林业实验中心伏波实验场内（106°39′0″~106°59′30″E, 21°57′47″~22°19′27″N），属于亚热带季风气候区，气候温暖，热量丰富，降水丰沛，干湿分明，年均温度约为 21 ℃，年均降雨量约为 1 400 mm，降雨主要集中在每年的 4—9 月。低山丘陵为该区域的主要地貌类型，其土壤类型主要为花岗岩在高温、干湿交替条件下风化形成的酸性红壤。站内人工针叶林以马尾松（*Pinus massoniana*）和杉木为主，阔叶树种主要有红锥、米老排、火力楠（*Michelia macclurei*）、格木（*Erythrophleum fordii*）、桉树（*Eucalyptus urophylla*）等，种植模式以纯林和混交林为主。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

本研究选取位置临近的，具有相似地形、土壤质地、林龄和经营历史的31年生杉木纯林和3种阔叶林（红锥、米老排、红锥/米老排混交林）作为研究对象，每种林分类型分别随机构建4块20×20 m的独立样方，同种林分的独立样方之间间隔至少100 m。所选的四种林分均于1991年种植，造林地为杉木采伐迹地，初始种植密度为每公顷2 500株，造林初期进行过两次间伐，之后均不再进行人工干扰。在每个样方离地高度0.5 m处随机布设6个1 m× 1 m孔径为1 mm的尼龙网收集框，用于监测其凋落物的年产量。样地基本情况见表1。

表1 样地基本信息

Table 1 Main characteristics in different forest type

样地类型 Stand type	海拔 Altitude (m)	坡度 Slope (°)	密度 SD (trees • hm^{-2})	胸径 DBH (cm)	树高 TH (m)	凋落物量 LF （kg • hm^{-2} • $year^{-1}$）
杉木纯林 Pure plantation of *Cunninghamia lanceolata*	453.3	33.5	1112	19.86±0.44	19.44±0.53	5273.96±213.83 d
红锥纯林 Pure plantation of *Castanopsis hystrix*	528.5	32.8	556	29.04±1.04	27.35±0.79	6673.47±207.92 c
米老排纯林 Pure plantation of *Mytilaria laosensis*	543.5	35.3	644	27.27±1.35	23.69±1.07	8360.59±290.22 a
红锥/米老排混交林 Mixed plantation of *Castanopsis hystrix* and *Mytilaria laosensis*	545.8	30.0	588	26.98±1.04	24.67±0.77	7514.49±226.44 b

注：数值=平均值±标准误，n=4。**SD**. 林分密度；**DBH**. 胸径；**TH**. 树高；**LF**. 凋落物量。

Note：Data are means ± SE, n=4. **SD**. Stand density；**DBH**. Diameter at breast height；**TH**. Tree height；**LF**. Litterfall mass.

1.2.2 样品采集

2022年8月进行土壤采集，考虑到红锥与米老排混交林树木具有随机分布的特点，本研究采用系统样点布设法来确定土壤采样点，将每个样地（20 m×20 m）分为16个5 m×5 m的正方形网格，网格交点即为采样点（9个）。根际土壤和非根际土壤的采集主要参照Cui等（2019）的方法进行，去除采样点表面的凋落物和杂质后采集0~10 cm土层的土壤，将松散结合在根系上的土壤抖掉，将还附着在植物根系上的土壤作为根际土壤样品，抖落的土壤作为非根际土壤样品。将采集后的土壤样品密封低温保存并迅速带回实验室，每个土壤样品过孔径为2 mm的筛，去除石块、根系以及土壤动植物，一部分土壤自然风干，研磨后用于土壤理化性质分析；另一部分置于-20 ℃冰箱中保存，用于土壤P组分、酶活性及微生物生物量的测定。

1.2.3 样品分析

土壤基本理化性质的测定主要参照《土壤农化分析》一书所描述的方法（鲍士旦，2000）。土壤含水率（water content of soil，SWC%）采用烘干法测定；pH值采用pH计测定（土∶水 = 1∶2.5，*m/V*）；土壤有机碳（soil organic carbon，SOC）采用重铬酸钾-外加热法测定；土壤全氮（total nitrogen，TN）经H_2SO_4-混合加速剂消解提取后用连续流动分析仪（SEAL Auto Analyzer3）测定；土壤铵态氮（NH_4^+-N）和硝态氮（NO_3^--N）的含量用2 mol·L^{-1}KCl溶液浸提后，使用连续流动分析仪测定；土壤TP用H_2SO_4-$HClO_7$消解提取，AP用双酸（HCl-H_2SO_4）浸提，均采用钼蓝比色法测定。

土壤微生物生物量碳（MBC）、氮（MBN）、MBP采用氯仿熏蒸萃取法测定，其中MBC和MBN用0.5 mol·L^{-1} K_2SO_4溶液浸提，在TOC分析仪（Multi N/C 3100，德国）上测定。MBP用0.5 mol·L^{-1} $NaHCO_3$浸提后，采用钼蓝比色法测定。

采用96微孔板荧光法测定参与土壤C、N、P循环相关的土壤酶活性，称取1.25 g土壤样品，加入125 mL的CH_3COONa缓冲溶液，在4 ℃条件下制成土壤悬浮液，吸取200 μL土壤悬浮液于酶标板中，随后加入相应酶底物，在25 ℃条件下黑暗培养3 h，加入5 μL

的 0.5 mol·L^{-1}NaOH 溶液终止反应，使用酶标仪在 365~450 nm 波长条件下测定其荧光值。酶活性大小统一用 nmol·g^{-1}·h^{-1}表示，所测定的酶种类、功能及底物信息详见表 2。

表 2 土壤 C、N、P 水解酶底物基本信息

Table 2 Basic information of soil C，N and P hydrolase substrates

酶种类 Enzyme type	名称 Enzyme	功能 Function	底物及浓度 Substrate and concentration
C 水解酶 C-hydrolase	β-葡萄糖苷酶 β-glucosidase，BG	降解纤维素 Cellulose hydrolysis	4-MUB-β-D-glucopyranoside (200 μmol·L^{-1})
	纤维二糖水解酶 Cellobiohydrolase，CB	降解纤维素 Degraded cellulose	4-MUB-β-D-cellobioside (200 μmol·L^{-1})
N 水解酶 N-hydrolase	N-乙酰-葡萄糖苷酶 β-N-acetyl glucosaminidase，NAG	降解几丁质 Degrades chitin	4-MUB-N-acetyl-β-D-glucosaminide (200 μmol·L^{-1})
	亮氨酸氨基肽酶 Leucine aminopeptidase，LAP	降解蛋白质 Degraded protein	L-leucine-7-amino-4-methylcoumarin (200 μmol·L^{-1})
P 水解酶 P-hydrolase	酸性磷酸酶 Acid phosphatase，ACP	催化酯化磷酸基 Catalytic esterification of phosphate groups	4-MUB-phosphate (100 μmol·L^{-1})

土壤 P 组分测定采用 Deluca 等（2015）基于生物有效性的 P 组分测定方法（BBP 法）：平行称取混匀的鲜土样 0.5 g 于 4 个 15 mL 离心管中，在 4 个离心管中分别加入 10 mL 0.01 mol·$L^{-1}$$CaCl_2$溶液、10 mL 0.01 mol·$L^{-1}$柠檬酸溶液、10 mL 0.02 EU·$mL^{-1}$酶混合提取液、10 mL 1 mol·$L^{-1}$盐酸溶液，封口后于震荡机中震荡 3 h（180 rpm，25 ℃）。震荡后充分摇匀，将枪头伸到离心管 2/3 深度位置处吸取 1 mL 混合液于 1.5 mL 离心管中，离心 1 min（10000 rpm，25 ℃），最后采用孔雀石绿法测定上清液的 P 浓度。

1.2.4 数据分析

土壤 P 素活化系数（phosphorus activation coefficient，*PAC*）计算公式如下（李萌等, 2022）：

$$PAC=\frac{AP}{TP\times1000}\times100\%$$

式中：*AP* 为速效磷（mg·kg^{-1}）；*TP* 为全磷（g·kg^{-1}）。

运用 SPSS 26.0 软件对实验数据进行单因素方差分析（one-way ANOVA），分别比较不同林分根际和非根际土壤理化性质、微生物生物量、酶活性和 P 组分的差异性，事后检验采用（least significant difference，LSD），显著性水平设置为 $P<0.05$。用 Canoco 5 软件，以不同林分的土壤 P 组分为响应变量，土壤理化性质为解释变量进行冗余分析（redundancy analysis，RDA）。采用 Origin Pro 2023 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 杉木林改造成阔叶林的根际和非根际土壤理化特征

由表3可知，在根际和非根际土壤中，改造后红锥林的SOC、TN、NH_4^+-N、NO_3^--N、AP、C/P、N/P、SWC含量均显著高于杉木林（P<0.05）；米老排林的SOC、TN、NH_4^+-N、NO_3^--N、TP、N/P、SWC含量显著高于杉木林（P<0.05）；红锥/米老排混交林的SOC、TN、NH_4^+-N、NO_3^--N、TP、AP、SWC含量显著高于杉木林（P<0.05）。

表3 土壤基本理化性质

Table 3 Soil physicochemical properties

	林分类型 Stand type	SOC（g·kg^{-1}）	TN（g·kg^{-1}）	NH_4^+-N（mg·kg^{-1}）	NO_3^--N（mg·kg^{-1}）	TP（g·kg^{-1}）	AP（mg·kg^{-1}）	C/N	C/P	N/P	pH	SWC
R	杉木林 *Cunninghamia lanceolata* plantation	20.31±1.43 c	2.43±0.10 b	9.78±0.60 c	10.23±0.74 b	0.26±0.02 b	3.19±0.31 b	8.43±0.78 ab	79.41±10.65 b	9.32±0.46 c	4.41±0.16 a	28.76±2.73 c
	红锥林 *Castanopsis hystrix* plantation	37.75±1.49 a	3.70±0.22 a	16.23±0.89 ab	19.33±0.81 a	0.30±0.01 ab	6.02±0.43 a	10.24±0.33 a	125.41±5.47 a	12.29±0.67 ab	4.15±0.04 a	36.63±1.43 b
	米老排林 *Mytilaria laosensis* plantation	32.43±1.69 ab	4.28±0.33 a	18.72±0.96 a	20.21±0.87 a	0.33±0.01 a	3.70±0.41 b	7.68±0.54 b	98.59±3.88 b	12.97±0.74 a	4.22±0.07 a	58.74±2.84 a
	红锥/米老排混交林 The mixed plantation of *Castanopsis hystrix* and *Mytilaria laosensis*	29.39±1.70 b	3.53±0.16 a	15.35±0.46 b	18.72±1.02 a	0.33±0.01 a	6.52±0.45 a	8.40±0.72 ab	89.19±5.79 b	10.67±0.23 bc	4.16±0.04 a	44.02±0.84 b
NR	杉木林 *Cunninghamia lanceolata* plantation	13.91±0.50 c	1.70±0.10 b	3.76±0.39 c	6.13±0.36 b	0.24±0.01 b	1.39±0.15 b	8.21±0.32 ab	59.49±3.42 b	7.23±0.24 b	4.50±0.15 a	23.99±2.06 c
	红锥林 *Castanopsis hystrix* plantation	25.61±1.21 a	2.84±0.09 a	7.56±0.31 ab	13.41±0.39 a	0.26±0.01 ab	3.20±0.12 a	9.01±0.21 a	98.22±7.59 a	10.88±0.64 a	4.30±0.04 a	33.40±1.68 b
	米老排林 *Mytilaria laosensis* plantation	21.10±1.15 b	3.08±0.16 a	8.13±0.06 a	14.16±1.01 a	0.29±0.01 a	1.56±0.08 b	6.87±0.38 b	73.82±4.27 b	10.79±0.62 a	4.39±0.03 a	41.18±1.19 a
	红锥/米老排混交林 The mixed plantation of *Castanopsis hystrix* and *Mytilaria laosensis*	19.49±0.89 b	2.68±0.21 a	6.85±0.06 b	12.15±0.40 a	0.29±0.01 a	3.63±0.19 a	7.41±0.68 b	66.60±3.24 b	9.15±0.70 ab	4.30±0.03 a	34.98±2.02 b

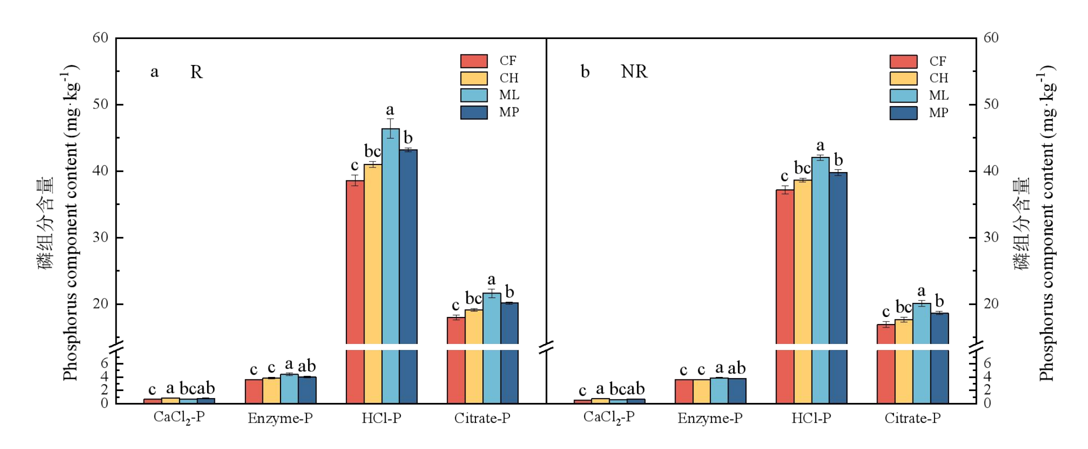
注：**R**. 根际土壤；**NR**. 非根际土壤；**SOC**. 有机碳；**TN**. 全氮；**NH_4^+-N**. 铵态氮；**NO_3^--N**. 硝态氮；**TP**. 全磷；**AP**. 有效磷；**C/N**. 碳氮比；**C/P**. 碳磷比；**N/P**. 氮磷比；**pH**. 酸碱度；**SWC**. 含水量；表中同列不同字母表示根际或非根际土壤不同林分间差异性显著（P<0.05）。

Note：**R**. Rhizosphere soils；**NR**. Non-rhizosphere soil；**SOC**. Soil organic carbon；**TN**. Total nitrogen；**NH_4^+-N**. Ammonium nitrogen；**NO_3^--N**. Nitrate nitrogen；**TP**. Total phosphorus；**AP**. Available phosphorus；**C/N**. Ratio of organic carbon to total nitrogen；**C/P**. Ratio of organic carbon to total phosphorus；**N/P**. Ratio of total nitrogen to total phosphorus；**pH**. pH value；**SWC**. Water content；Different letters in the same column of the table indicate significant differences between different stands of rhizosphere or non-rhizosphere soil（P<0.05）.

2.2 杉木林改造成阔叶林的根际和非根际土壤磷组分和活化系数特征

由图 1 可知，杉木林改造成阔叶林后，根际和非根际土壤中各 P 组分含量表现为盐酸提取磷（HCl-P）> 柠檬酸提取磷（Citrate-P）> 酶提取磷（Enzyme-P）> 氯化钙提取磷（$CaCl_2$-P），并且根际土壤各 P 组分含量比非根际土壤高。在根际土壤中，与杉木纯林相比，红锥林和红锥/米老排混交林的 $CaCl_2$-P 含量分别增加了 33.9%和 21.6%（$P<0.05$）；米老排林和红锥/米老排混交林的 Enzyme-P 含量分别增加了 20.6%和 9.9%（$P<0.05$）；米老排林和红锥/米老排混交林的 HCl-P 含量分别增加了 22.2%、12.0%（$P<0.05$）；米老排林和红锥/米老排混交林的 Citrate-P 含量分别增加了 20.2%和 12.0%（$P<0.05$）（图 1：a）。在非根际土壤中，与杉木纯林相比，红锥林和红锥/米老排混交林的 $CaCl_2$-P 含量分别增加了 42.6%和 28.9%（$P<0.05$）；Enzyme-P 含量分别增加了 8.5%和 4.8%（$P<0.05$）；HCl-P 含量分别增加了 13.1%和 7.0%（$P<0.05$）；Citrate-P 含量分别显著增加了 18.8%和 10.2%（$P<0.05$）（图 1：b）。

从图 2 可知，杉木林改造成阔叶林后，在根际土壤中，红锥林和红锥/米老排混交林的 PAC 比杉木纯林分别显著提高了 62.2%和 60.3%（$P<0.05$）；红锥林和红锥/米老排混交林的 PAC 分别比米老排林显著提高了 78.0%和 75.9%（$P<0.05$）（图 2：a）。在非根际土壤中，红锥林和红锥/米老排混交林的 PAC 比杉木林分别显著提高了 109.3%和 111.2%（$P<0.05$），红锥林和红锥/米老排混交林的 PAC 分别比米老排林显著提高了 124.6%和 126.7%（$P<0.05$）（图 2：b）。不同土壤类型中杉木林和米老排林的 PAC 均无显著差异（$P>0.05$）（图 2：b）。



R. 根际土壤；**NR**. 非根际土壤；**CF**. 杉木林；**CH**. 红锥林；**ML**. 米老排林；**MP**. 红锥/米老排混交林；**$CaCl_2$-P**. 氯化钙提取磷；**Enzyme-P**. 酶提取磷；**HCl-P**. 盐酸提取磷；**Citrate-P**. 柠檬酸提取磷；不同字母表示根际或非根际土壤不同林分间差异显著（$P<0.05$）。下同。

R. Rhizosphere soils；**NR**. Non-rhizosphere soil；**CF**. *Cunninghamia lanceolata* plantation；**CH**. *Castanopsis hystrix* plantation；**ML**. *Mytilaria laosensis* plantation；**MP**. The mixed plantation of *Castanopsis hystrix* and *Mytilaria laosensis*；**$CaCl_2$-P**. Phosphorus extracted from calcium chloride；**Enzyme-P**. Phosphorus extracted by enzyme；**HCl-P**. Phosphorous extraction by hydrochloric acid；**Citrate-P**. Citric acid extracted from phosphorus；Different letters in the figure indicate significant differences between different stands of rhizosphere or non-rhizosphere soil ($P<0.05$). The same below.

图 1 不同林分类型的根际和非根际土壤磷组分含量变化

Fig. 1 Changes of phosphorus content in rhizosphere and non-rhizosphere soils of different stand types

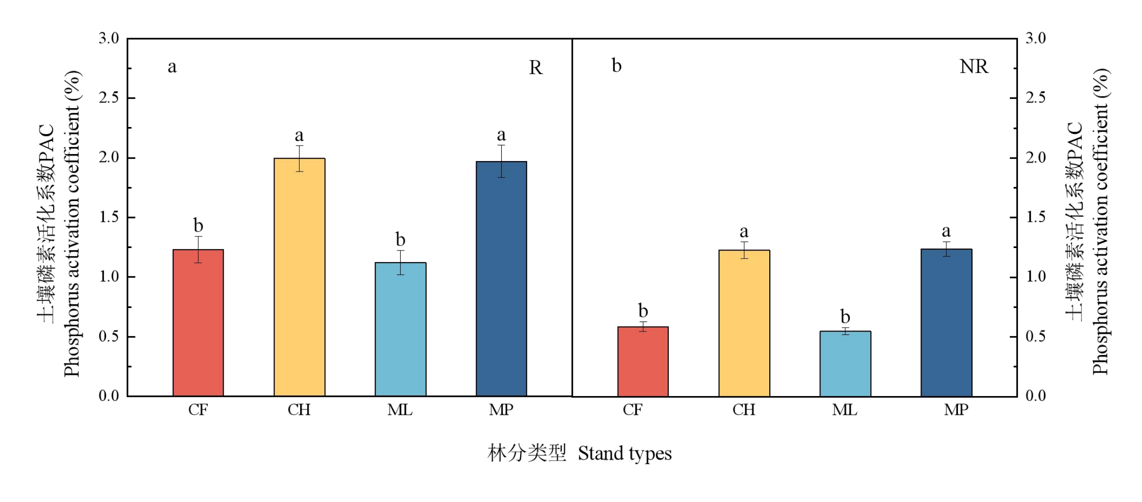


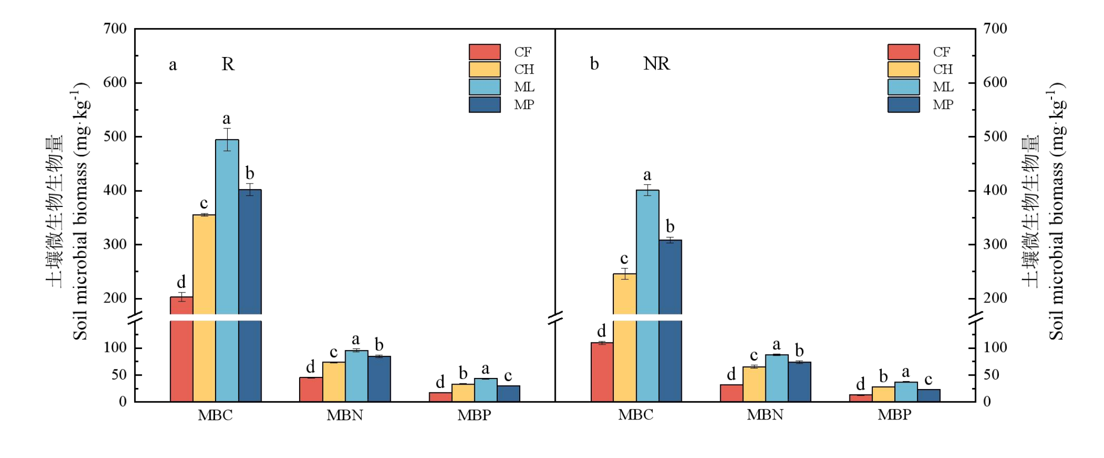
图 2 不同林分类型根际和非根际土壤 PAC 的变化

Fig. 2 PAC changes in rhizosphere and non-rhizosphere soils of different stand types

2.3 杉木林改造成阔叶林的根际和非根际土壤微生物生物量和酶活性特征

杉木林改造成阔叶林后，在根际土壤和非根际土壤中，红锥林、米老排林及红锥/米老排混交林的 MBC、MBN、MBP 含量均显著高于杉木林，并且根际土壤较非根际土壤含量高（图 3）。在根际土壤中，与杉木林相比，红锥林的 MBC、MBN 和 MBP 分别显著增加了 75.5%、62.4%和 94.4%（P<0.05），米老排林的 MBC、MBN 和 MBP 分别显著增加了 144.1%、112.2%和 153.0%（P<0.05），红锥/米老排混交林的 MBC、MBN 和 MBP 分别显著增加了 98.4%、87.5%和 77.8%（P<0.05）（图 3：a）。在非根际土壤中，与杉木林相比，红锥林的 MBC、MBN 和 MBP 分别显著增加了 124.6%、106.2%和 117.0%（P<0.05），米老排林的 MBC、MBN 和 MBP 分别显著增加了 266.1%、175.4%和 186.4（P<0.05），红锥/米老排混交林的 MBC、MBN 和 MBP 分别显著增加了 181.5%、133.5%和 78.7%（P<0.05）（图 3：b）。

由图 4 可知，阔叶林的五种酶活性（BG、CB、NAG、LAP、ACP）均显著高于杉木林，不同林分的根际土壤酶活性均高于非根际土壤。红锥林和红锥/米老排混交林的根际和非根际土壤 BG 酶活性均显著大于杉木林和米老排林（P<0.05）。红锥林、米老排林和红锥/米老排混交林的根际和非根际土壤 CB、NAG、LAP 和 ACP 酶活性均显著大于杉木林（P<0.05）。

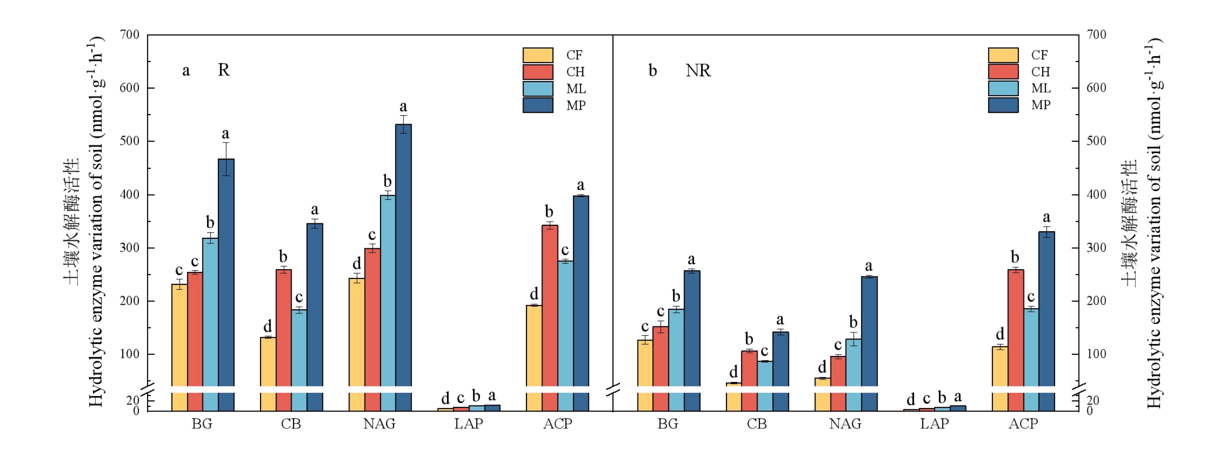


MBC. 微生物生物量碳；**MBN**. 微生物生物量氮；**MBP**. 微生物生物量磷。

MBC. Microbial biomass carbon；**MBN**. Microbial biomass nitrogen；**MBP**. Microbial biomass phosphorus.

图 3 不同林分类型根际和非根际土壤微生物生物量的变化

Fig. 3 Changes of rhizosphere and non-rhizosphere soil microbial biomass in different stand types



BG. β-葡萄糖苷酶；**CB**. 纤维二糖水解酶；**NAG**. N-乙酰-葡萄糖苷酶；**LAP**. 亮氨酸氨基肽酶；**ACP**. 酸性磷酸酶。

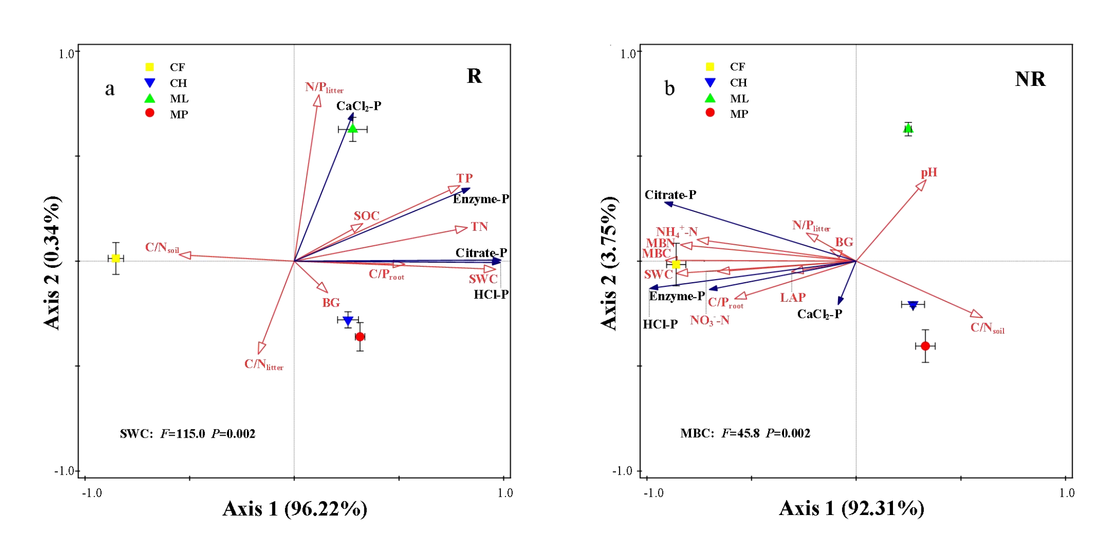
BG. β-glucosidase；**CB**. Cellobiohydrolase；**NAG**. β-N-acetyl glucosaminidase；**LAP**. Leucine aminopeptidase；**ACP**. Acid phosphatase.

图 4 不同林分类型根际和非根际土壤酶活性的变化

Fig. 4 Changes of soil enzyme activity in rhizosphere and non-rhizosphere of different stand types

2.4 影响根际和非根际土壤磷组分的主要生物和非生物因素

由 RDA 分析结果可知：在根际土壤中，第一主轴和第二主轴分别解释了土壤 P 组分变化的 96.22%和 0.34%，其中第一主轴将杉木林和红锥林、米老排林及红锥/米老排混交林明显分开（图 5a）。在非根际土壤中，第一主轴和第二主轴分别解释了 P 组分变化的 92.31%和 3.75%，其中第一主轴将杉木林和红锥林、米老排林及红锥/米老排混交林明显分开（图 5b）。SWC（F=115，P=0.002）是驱动根际土壤 P 组分变异的最关键因子，而 MBC（F=45.8，P=0.002）是驱动非根际土壤中 P 组分变异的最关键因子。



R. 根际土壤；**NR**. 非根际土壤；**CaCl₂-P**. 氯化钙提取磷；**Enzyme-P**. 酶提取磷；**HCl-P**. 盐酸提取磷；**Citrate-P**. 柠檬酸提取磷；**SWC**. 含水量；**TP**. 全磷；**N/P_{litter}**. 凋落物氮磷比；**TN**. 全氮；**C/N_{litter}**. 凋落物碳氮比；**C/N_{soil}**. 土壤碳氮比；**SOC**. 有机碳；**BG**. β-葡萄糖苷酶；**C/P_{root}**. 根系碳磷比；**MBC**. 微生物生物量碳；**NO_3^--N**. 硝态氮；**pH**. 酸碱度；**MBN**. 微生物生物量氮；**NH_4^+-N**. 铵态氮；**LAP**. 亮氨酸氨基肽酶。

R. Rhizosphere soils；**NR**. Non-rhizosphere soil；**$CaCl_2$-P**. Phosphorus extracted from calcium chloride；**Enzyme-P**. Phosphorus extracted by enzyme；**HCl-P**. Phosphorous extraction by hydrochloric acid；**Citrate-P**. Citric acid extracted from phosphorus；**SWC**. Water content；**TP**. Total phosphorus；**N/P_{litter}**. Nitrogen/Phosphorus ratio of litter；**C/N_{soil}**. Carbon/Nitrogen ratio of soil；**SOC**. Soil organic carbon；**BG**. β-

glucosidase； **C/P_{root}**. Carbon/Phosphorus ratio of root； **MBC**. Microbial biomass carbon； **NO_3^--N**. Nitrate Nitrogen； **pH.** pH value； **MBN**. Microbial biomass nitrogen； **NH_4^+-N**. Ammonium nitrogen； **LAP**. Leucine aminopeptidase.

图 5 不同林分类型根际和非根际土壤磷组分与主要环境因子的冗余分析（RDA）

Fig. 5 Redundancy analysis of phosphorus components and major environmental factors in rhizosphere and non-rhizosphere soils of different stand types（RDA）

3 讨论

3.1 杉木林改造成阔叶林对根际和非根际土壤磷组分的影响

在本研究中，将杉木林改造成阔叶林后，无论在根际还是非根际土壤中各 P 组分含量均有不同程度的提高，且不同林分根际土壤中各 P 组分含量均比非根际土壤高，这可能是因为根系对 P 具有较强的吸收和富集能力，其次根际范围内微生物活性较高，利于 P 的矿化，提高 P 含量，从而导致根际土壤中各 P 组分含量高于非根际土壤。各 P 组分含量表现出 HCl-P > Citrate-P > Enzyme-P > $CaCl_2$-P，这与杨豆（2022）的研究结果一致。$CaCl_2$-P 相较于其他 P 组分含量较低，可能是因为作为直接被根际截留或扩散的 P，能直接被植物所吸收利用。在根际和非根际土壤中，红锥林和红锥/米老排混交林的 $CaCl_2$-P 含量显著高于杉木林；Enzyme-P 作为一种土壤 Po 组分，易被酸性磷酸酶和植酸酶水解呈 HPO_4^{2-}和 $H_2PO_4^-$，其含量在米老排林和红锥/米老排混交林中显著高于杉木林和红锥林；HCl-P 和 Citrate-P 作为稳定态的 Pi，是土壤中的潜在 P 库，米老排林和红锥/米老排混交林中的含量显著高于杉木林。这表明杉木林改造成阔叶林后，有利于增加易溶性 P 的含量，提高土壤 P 的有效性，也有利于 Pi 的大量积累，提高土壤的 P 供应潜力。这可能是由于：（1）阔叶树种及其混交林下凋落物量增多，P 素通过植物残体分解归还土壤，使得土壤各 P 组分增加（Tian et al., 2019）；（2）长期积累的凋落物可以减少因地表裸露而造成的土壤 P 流失（贾淑娴等，2019）；（3）不同树种的根际生物化学过程不同，植物根系和微生物分泌有机酸和酶的能力也随之不同，导致不同林分的 P 组分含量产生差异。

土壤中不同形态 P 始终处于动态平衡过程中，相互影响和制约，其含量变化影响着土壤 P 有效性（沈开勤等，2023）。在本研究中，改造后的阔叶林根际和非根际土壤 TP、AP 和 MBP 含量增加，一方面，可能是由于阔叶林凋落物量增多，导致归还到土壤中的养分增加，从而使土壤 TP 含量增加，且阔叶林土壤含水量较高（表 3），利于微生物生长，提高微生物活性，使 MBP 含量增加，影响土壤中不同形态的 P 素积累；另一方面，可能是由于杉木林改造成阔叶林后土壤各 P 组分含量增加，从而提高 TP 和 AP 含量，其次阔叶林中 SOC 含量较高，土壤 P 的矿化作用增强，利于提高土壤 P 有效性。王涛等（2020）研究也发现，在杉木采伐迹地上营造阔叶林可以提高土壤 P 的有效性。

3.2 杉木林改造成阔叶林对根际和非根际土壤磷转化的影响

土壤 P 转化的实质是不同 P 素形态之间的相互转化（张梅，2022），并且受植被类型、土壤理化性质、微生物以及水分等因素的影响（方晰等，2018；黄翊兰等，2019）。土壤酸性磷酸酶（ACP）在 P 转化过程中起重要的作用，其活性的高低直接反映土壤 P 转化效率（郑棉海等，2015）。本研究中，红锥林、米老排林和红锥/米老排混交林的土壤 ACP 值均显著高于杉木林，其中根际土壤 ACP 值均比非根际土壤高，说明将杉木林改造成阔叶林有利于 P 素转化，提高 P 有效性，根际土壤效果比非根际土壤显著。阔叶林凋落物数量和分解速率较针叶林高，可以为微生物的生长和繁殖提供大量的营养物质，这在一定程度上促进了 ACP 的合成（贺红月等，2018）。

本研究也发现，杉木林改造成阔叶树种后，根际和非根际土壤中微生物生物量（MBC、MBN、MBP）和酶（BG、CB、NAG、LAP、ACP）的活性均高于杉木人工林，主要因为阔叶林土壤中 SOC 和 TN 含量较高（表 3），可为微生物提供充足的 C 和 N 源，刺激微生物活动，提高土壤酶活性，促进不同形态 P 之间的转化。郭源（2022）在研究不同树种细

根形状特征时发现，杉木生长的土壤往往比较贫瘠，只能向更广更深的地方吸取养分，因此杉木的细根一般比阔叶树的细根分枝更少，直径更粗，对土壤养分的利用率更低。这进一步表明，杉木林改造成阔叶林后，可以提高土壤中微生物生物量及其活性，改变土壤 P 的转化速率和养分竞争强度，进而影响有效 P 的含量。

本研究中，SWC 是影响根际土壤 P 组分变化的关键环境因子，MBC 是影响非根际土壤中 P 组分变化的关键环境因子。已有研究发现，土壤 P 素在含水量提高的情况下矿化速率更快（秦胜金等，2007；蔡观等，2017），且磷酸根离子由非根际土壤向根际土壤扩散的量增加（李法云等，1999）。本研究中阔叶林的土壤含水率、微生物生物量及各 P 组分含量均显著大于杉木人工林，可能是因为不同林分地表凋落物的质量和数量不同，导致其微生物多样性和土壤含水率也不同。相对于杉木林而言，阔叶林的土壤含水率较高，从而提高土壤微生物活性，有利于微生物和根系产生大量分泌物，如 ACP、低分子有机酸和 H^+ 等（秦胜金等，2006；田娟等，2008）。土壤中的 Citrate-P 含量增加可能是因为有机酸通过配位交换作用，与磷酸根（HPO_4^{2-}和 $H_2PO_4^-$）竞争土壤颗粒表面的阴离子吸附位点，促进吸附于黏粒上或弱束缚于无机沉淀物中的无机活性 P 的释放，增加稳定性 Pi 组分含量；而 H^+能活化难溶性矿物质 P，使 HCl-P 含量增加，从而增加中等稳定性 Pi 组分含量（蒋炳伸等，2020）；ACP 可以提高土壤无机活性 P 和有机活性 P 的矿化率从而使 Enzyme-P 含量提高，增加 Po 组分含量（胡怡凡等，2021）。

4 结论

杉木林改造成阔叶林后，根际和非根际土壤P组分发生显著变化，阔叶林的AP、TP和MBP含量及与P转化相关的ACP含量均显著高于杉木林，SWC是驱动根际土壤P组分变化的关键环境因子，MBC是调控非根际土壤中P组分变化的关键环境因子。表明杉木人工纯林转化成阔叶林后（尤其是阔叶树种混交林）土壤理化性质得到明显改善，促进微生物活动，提高ACP酶活性，促进Po组分矿化和Pi组分的溶解和释放，有利于土壤P的储存和转化，从而增加植物养分的供应，并间接影响亚热带的森林生产力，有利于人工林生态系统的可持续发展。

参考文献：

BAO SD, 2000: Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press: 1-120. [鲍士旦，2000. 土壤农化分析 第3版[M]. 北京：中国农业出版社：1-120.]

BI QF, 2020. Different fertilization modes and cultivation years affect soil phosphorus availability and carbon-nitrogen-phosphorus coupling transformations and their microbial mechanisms[D]. Hangzhou: Zhejiang University: 7-8. [毕庆芳，2020. 施肥模式和耕作年限影响土壤磷有效性和碳氮磷耦合转化的微生物学机制[D]. 杭州：浙江大学：7-8.]

CAI G, HU YJ, WANG TT, et al, 2017. Characteristics and influencing factors of biologically-based phosphorus fractions in the farml and soil[J]. Chin J Environ Sci, 38(4): 1606-1612. [蔡观，胡亚军，王婷婷，等，2017. 基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析[J]. 环境科学，38(4): 1606-1612.]

CAI MK, 2021. Research on soil elemental stoichiometry and its key influencing factors in *Larix principis-rupprechtii* plantations at Mt. Taiyue.[D]. Beijing: Beijing Forestry University: 97-136. [蔡锰柯，2021. 太岳山华北落叶松林土壤化学计量特征及关键影响因子研究[D]. 北京：北京林业大学：97-136.]

FANG X, CHEN JL, WANG LF, et al, 2018. Research progress on soil phosphorus availability and its influential factors in subtropical forests[J]. J Cent South Univ For Technol, 38(12): 1-12. [方晰，陈金磊，王留芳，等，2018. 亚热带森林土壤磷有效性及其影响因素的研究进展[J]. 中南林业科技大学学报，38(12): 1-12.]

GUO Y, 2022. Differences in Species Composition and soil properties during conversion in an evergreen broad-leaved forest[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University: 23-27. [郭源，2022. 常绿阔叶林转换过程中物种组成与土壤性质的差异[D]. 南昌：江西农业大学：23-27.]

HE HY, MA CM, MU HX, et al, 2018. The Decomposition Characteristics and Soil Nutrient Dynamics of Leaf Litter Mixture of *Larix principis-rupprechtii* and *Betula platyphylla*[J]. For Resour Manage, 2018(3): 93-100. [贺红月，马长明，牟洪香，等，2018. 华北落叶松和白桦叶凋落物混合分解特征及土壤养分动态[J]. 林业资源管理，2018(3): 93-100.]

HU YF, LIU JP, WANG ZK, et al, 2021. Rotation increases soil phosphorous bioavailability and improves phosphorous nutrition of the latter crop in rotation[J]. Plant Nutr Fert Sci, 27(8): 1305-1310. [胡怡凡，刘佳坪，王子楷，等，2021. 轮作提高土壤磷生物有效性改善后茬作物磷素营养[J]. 植物营养与肥料学报，27(8): 1305-1310.]

HUANG YL, CUI LJ, LI CY, et al, 2019. Biologically-based availability and influencing factors of soil phosphorus under different vegetation in coastal beach wetlands[J]. Ecol Environ Sci, 28(10): 1999-2005. [黄翊兰，崔丽娟，李春义，等，2019. 滨海滩涂湿地不同植被土壤磷的生物有效性及其影响因子分析[J]. 生态环境学报，28(10): 1999-2005.]

JIA SX, WU CJ, LIU XF, et al, 2019. Effects of harvest residue treatments on soil phosphorus fractions and availability in a young Chinese fir plantation[J]. Chin J Appl Ecol, 30(11): 3662-3670. [贾淑娴，吴传敬，刘小飞，等，2019. 采伐剩余物的处理方式对杉木幼林土壤磷组分及其有效性的影响[J]. 应用生态学报，30(11): 3662-3670.]

JIANG BS, SHEN JL, WANG J, et al, 2020. Effect of straw incorporation on biologically-based phosphorus fractions and phosphorus uptake by rice in paddy field[J]. J Soil Water Conserv, 34(6): 309-317. [蒋炳伸，沈健林，王娟，等，2020. 秸秆还田稻田土壤生物有效性磷及水稻磷吸收[J]. 水土保持学报，34(6): 309-317.]

LI FY & GAO ZQ, 1999. Transformation mechanism and availability of nutrients in albic soil-plant system IV. Effect of environmental factors on phosphorus availability in albic soil.[J]. Chin J Appl Ecol, 10(5): 579-582. [李法云，高子勤，1999. 白浆土-植物系统营养物质转化机制及其有效性研究Ⅳ. 环境条件对土壤磷素有效性的影响[J]. 应用生态学报，10(5): 579-582.]

LI LJ, XIE TT, ZHANG SL, et al, 2020. Characteristics of nutrient content and enzyme activity in the rhizosphere and bulk soils of four suitable plant species in the hydro-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir[J]. Acta Ecol Sin, 40(21): 7611-7620. [李丽娟，谢婷婷，张松林，等，2020. 三峡库区消落带4种适生植物根际与非根际土壤养分与酶活性特征研究[J]. 生态学报，40(21): 7611-7620.]

LI M, TAN XM, XIAO N, et al, 2022. Effects of introducing *Dalbergia odorifera* and *Acricarpus fraxinifolius* on soil phosphorus transformation and availability in rocky desertification mountainous regions[J]. Acta Ecol Sin, 42(4): 1594-1605. [李萌，谭许脉，肖纳，等，2022. 引种降香黄檀和顶果木对石漠化山区土壤磷素转化及其有效性的影响[J]. 生态学报，42(4): 1594-1605.]

LIN JC, 2007. A study on the soil water- physical properties in mixed plantations between Liquidambar formosana and *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana*[J]. Subtrop Soil Water Conserv, 2007(3): 1-3. [林建椿，2007. 枫香与杉木、马尾松混交林土壤水分物理性质的研究[J]. 亚热带水土保持，2007(3): 1-3.]

LIN TL, 2000. Change of soil fertility of the forest land in which mixed forest of cunninghamia lanceolata and broad-leaved trees was constructed after continuous planting *Cunninghamia lanceolata* [J]. J Zhejiang For Sci Technol, 20(2): 23. [林同龙，2000. 杉木多代连栽林地营

造杉阔混交林后的土壤肥力变化[J]. 浙江林业科技，20(2): 23.]
MA ZL, ZHAO WQ, LIU M, et al, 2019. Effects of warming on microbial biomass carbon and nitrogen in the rhizosphere and bulk soil in an alpine scrub ecosystem[J]. Chin J Appl Ecol, 30(6): 1893-1900. [马志良，赵文强，刘美，等，2019. 增温对高寒灌丛根际和非根际土壤微生物生物量碳氮的影响[J]. 应用生态学报，30(6): 1893-1900.]
MING AG, LIU SR, NONG Y, et al, 2015. Comparison of carbon storage in juvenile monoculture and mixed plantation stands of three common broadleaved tree species in subtropical China[J]. Acta Ecol Sin, 35(1): 180-188. [明安刚，刘世荣，农友，等，2015. 南亚热带3种阔叶树种人工幼龄纯林及其混交林碳贮量比较[J]. 生态学报，35(1): 180-188.]
QIN SJ, LIU JS, WANG GP, 2006. Mechanism of phosphorus availability changing in soil[J]. Chin J Soil Sci, 37(5): 1012-1016. [秦胜金，刘景双，王国平，2006. 影响土壤磷有效性变化作用机理[J]. 土壤通报，37(5): 1012-1016.]
QIN SJ, LIU JS, WANG GP, et al, 2007. Phosphorus fractions under different land uses in Sanjiang Plain[J]. Chin J Environ Sci, 28(12): 2777-2782. [秦胜金，刘景双，王国平，等，2007. 三江平原不同土地利用方式下土壤磷形态的变化[J]. 环境科学，28(12): 2777-2782.]
SHEN KQ, LIU Q, YANG GT, et al, 2023. Effects of phosphorus reduction on soil phosphorus pool composition and phosphorus solubilizing microorganisms[J]. Chin Agric Sci, 56(15): 2941-2953. [沈开勤，刘倩，杨国涛，等，2023. 减量施磷对土壤磷库组成及解磷微生物的影响[J]. 中国农业科学，56(15): 2941-2953.]
SHU ZW, HAN R, WANG ZB, et al, 2022. Research progress on plant growth and metabolic regulation by salinity-loving microorganisms in saline-alkali soil[J]. Jiangsu Agric Sci, 50(16): 27-36. [舒志万，韩睿，王智博，等，2022. 盐碱土壤中嗜盐微生物促进植物生长与代谢调节研究进展[J]. 江苏农业科学，50(16): 27-36.]
TAN XM, ZHANG W, XIAO N, et al, 2022. Effects of understory plant species composition and diversity under transforming Chinese fir into precious indigenous broadleaf plantations[J]. Acta Ecol Sin, 42(7): 2931-2942. [谭许脉，张文，肖纳，等，2022. 杉木林改造成乡土阔叶林对林下植物物种组成和多样性的影响[J]. 生态学报，42(7): 2931-2942.]
TAN XM, 2022. Effects of *Pinus massoniana*/*Erythrophleum fordii* uneven-aged mixied transformantion on rhizosphere and non-rhizosphere soil phosphorus fractions and its potential regulatory mechanisms[D]. Nanning: Guangxi University: 3. [谭许脉，2022. 马尾松/格木异龄混交改造对根际和非根际土壤磷组分的影响及其潜在调控机制[D]. 南宁：广西大学：3.]
TIAN J, LIU L, DONG GM, et al, 2008. Study progress of phosphorus release mechanics in flooded soils[J]. Chin J Soil Sci, 39(2): 426-430. [田娟，刘凌，董贵明，等，2008. 淹水土壤磷释放机理研究进展[J]. 土壤通报，39(2): 426-430.]
WANG T, WAN XH, WANG L, et al, 2020. Effects of broadleaved tree plantation on soil phosphorus fractions and availability in different soil layers in a logged Cunninghamia lanceolata woodland[J]. Chin J Appl Ecol, 31(4): 1088-1096. [王涛，万晓华，王磊，等，2020. 杉木采伐迹地营造阔叶树对不同层次土壤磷组分和有效性的影响[J]. 应用生态学报，31(4): 1088-1096.]
YANG D, 2022. Effect of moso bamboo expands to broad-leaved and conifer forests on soil phosphorus bioavailability and its mechanism[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University: 19. [杨豆，2022. 毛竹向阔叶林和针叶林扩张对土壤磷生物有效性的影响及其机制[D]. 南昌：江西农业大学：19.]
ZHANG M, 2022. The effects of grazing and mowing on soil phosphorus pools andmicrobes

related to phosphorus transformation in Inner Mongolia grassland[D]. Wulumuqi: Xinjiang Agricultural University: 1-2. [张梅，2022. 放牧和刈割对内蒙古草原土壤磷库和磷转化相关功能菌群的影响[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学：1-2.]

ZHENG MH, CHEN H, ZHU XM, et al, 2015. Effects of the addition of mineral nutrients on biological nitrogen fixation in forest ecosystems[J]. Acta Ecol Sin, 35(24): 7941-7954. [郑棉海，陈浩，朱晓敏，等，2015. 矿质养分输入对森林生物固氮的影响[J]. 生态学报，35(24): 7941-7954.]

CUI YX, BING HJ, FANG L, et al, 2019. Diversity patterns of the rhizosphere and bulk soil microbial communities along an altitudinal gradient in an alpine ecosystem of the eastern Tibetan Plateau[J]. Geoderma, 338: 118-127.

DELUCA TH, GLANVILLE HC, HARRIS M, et al, 2015. A novel biologically-based approach to evaluating soil phosphorus availability across complex landscapes[J]. Soil Biol Biochem, 88: 110-119.

DING K, ZHANG Y, YRJÄLÄ K, et al, 2022. The introduction of *Phoebe bournei* into *Cunninghamia lanceolata* monoculture plantations increased microbial network complexity and shifted keystone taxa[J]. For Ecol Manage, 509: 120072.

FINK JR, INDA AV, BAVARESCO J, et al, 2016. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy[J]. Soil Tillage Res, 155: 62-68.

GHARU AD & TARAFDAR JC, 2016. Efficiency of phosphatases in mobilization of native phosphorus fractions under different vegetation[J]. Agric Res, 5(4): 335-345.

HU X, GU H, LIU J, et al, 2023. Metagenomic strategies uncover the soil bioavailable phosphorus improved by organic fertilization in mollisols[J]. Agric Ecosyst Environ, 349: 108462.

KELLER N, BOL R, HERRE M, et al, 2023. Catchment scale spatial distribution of soil enzyme activities in a mountainous German coniferous forest[J]. Soil Biol Biochem, 177: 108885.

KUZYAKOV Y, RAZAVI BS, 2019. Rhizosphere size and shape: Temporal dynamics and spatial stationarity[J]. Soil Biol Biochem, 135: 343-360.

LIANG J, LIU J, JIA P, et al, 2020. Novel phosphate-solubilizing bacteria enhance soil phosphorus cycling following ecological restoration of land degraded by mining[J]. ISME J, 14(6): 1600-1613.

PENG X, DAI Q, DING G, et al, 2017. Distribution and accumulation of trace elements in rhizosphere and non-rhizosphere soils on a karst plateau after vegetation restoration[J]. Plant Soil, 420(1-2): 49-60.

TIAN H, CHENG X, HAN H, et al, 2019. Seasonal variations and thinning effects on soil phosphorus fractions in *Larix principis-rupprechtii* Mayr. Plantations[J]. Forests, 10(2): 172-188.

TROITIÑO F, GIL-SOTRES F, LEIRÓS MC, et al, 2008. Effect of land use on some soil properties related to the risk of loss of soil phosphorus[J]. Land Degrad Dev, 19(1): 21-35.

XIA L, ZHAO BQ, LUO T, et al, 2022. Microbial functional diversity in rhizosphere and non-rhizosphere soil of different dominant species in a vegetation concrete slope[J]. Biotechnol Biotechnol Eqip, 36(1): 379-388.

YOU YM, XU HC, WU XP, et al, 2020. Native broadleaf tree species stimulate topsoil nutrient transformation by changing microbial community composition and physiological function, but not biomass in subtropical plantations with low P status[J]. For Ecol Manage, 477: 118491.